Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 106 (2014)

Heft: 3

Artikel: Die neue Wasserkrafttechnologie : Entwicklungen für das Elektrizitätssystem der Zukunft

Autor: Sick, Mirjam

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939747

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die neue Wasserkrafttechnologie: Entwicklungen für das Elektrizitätssystem der Zukunft

Mirjam Sick

Zusammenfassung

Strommarkt und Elektrizitätsnetz machen zurzeit in Europa eine rasante Entwicklung durch. Die wesentlichen Treiber hierbei sind die wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen – Liberalisierung des Energiemarkts, Klimapolitik und Förderung der neuen erneuerbaren Energiequellen – und die technologischen Herausforderungen, vor allem für die Sicherheit und Stabilität des Stromnetzes. Im Fokus dieses Artikels steht die Wasserkraft: ihre besondere Rolle im elektrischen Netz als regelndes, stabilisierendes Element und der technische Entwicklungsbedarf, um dieser Rolle zuverlässig und wirtschaftlich gerecht zu werden.

1. Das Stromnetz in Europa

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten wurde in Europa sukzessive eine Überkapazität an Stromproduktion aufgebaut. Das sollte für die Verbraucher eigentlich eine gute Nachricht sein, zumal der elektrische Strom als Energieträger an Bedeutung gewinnt. Die gezielte Förderung von volatilen erneuerbaren Energieformen, vor allem Wind und Sonne, hat aber einen hohen Preis, und ihre Einbindung in das elektrische Netz ist eine grosse technische Herausforderung, an der die Netzbetreiber gemeinsam mit Stromerzeugern und Stromverbrauchern arbeiten müssen. Lösungsansätze sind auf allen Ebenen des elektrischen Netzes gefragt: von der intelligenten Steuerung der Verbraucherseite («demand-side management», siehe [1]), neuen Lösungen auf der Verteilerebene, vom Ausbau der Netzinfrastruktur einschliesslich Gleichstromübertragung bis hin zur maximal flexiblen Steuerung der grossen Stromerzeugungseinheiten. Um die in Europa gewünschte Energiewende herbeizuführen und das Stromnetz der Zukunft aufzubauen, sind noch viele Schritte notwendig.

2. Welchen Beitrag kann die Wasserkraft zur Energiewende leisten?

Wasserkraftwerke liefern Strom aus erneuerbarer Energie und haben besonders hohe Qualitäten im Bereich der Netzdienstleistungen, das heisst

- Frequenzstabilität, indem Wirkleistung sehr schnell und flexibel geregelt wird
- Spannungsstabilität durch Regelung der Blindleistung
- Management schwerwiegender Fehler im System bis hin zur Fähigkeit, nach einem Blackout wieder Leistung ans Netz zu bringen

Um all diese Leistungen im Netz zu erbringen, betrachten wir das Wasserkraftwerk als Gesamtsystem aus Turbine, Generator, Leistungselektronik, Steuerung und Automation, welches optimal, stabil und schnell Leistungen ins elektrische Netz liefert. In *Bild 1* sind das Schema eines Wasserkraftwerks, und grau hinterlegt, die Anforderungen an ein Wasserkraftwerk im elektrischen Netz dargestellt.

Zwar ist die Wasserkraft eine ausgereifte Technologie, jedoch zur Erfüllung dieser neuen Anforderungen sind neue technische Lösungen gefragt oder zumindest eine energische Weiterentwicklung der bestehenden Technologie. Beispielsweise werden aufgrund der erhöhten Volatilität der Stromerzeugung Maschinensätze heute wesentlich häufiger gestoppt und wieder hochgefahren (bis zu mehreren Malen an einem Tag). Das bedeutet höhere mechanische Belastung der Turbine und des Generators sowie höhere thermisch bedingte Spannungen an der Hochspannungsisolation der Generatorstäbe. Um diese Anforderung zu erfüllen, wurden intensive Entwicklungsarbeiten bei Andritz-Hydro durchgeführt, Messungen am Prüfstand und an der Anlage vorgenommen, Berechnungsmethoden weiterentwickelt und das Design von Turbine und Generator entsprechend modifiziert. In diesem Artikel werden Beispiele von Entwicklungsschritten in der Wasserkrafttechnologie detaillierter dargestellt.

3. Leistungselektronik: Neue Lösungen mit variabler Drehzahl

Mit der Entwicklung der Frequenzumrichtertechnologie zu grossen Spannungen (von 3.3 und 6.6 bis 18 kV) und besseren Wirkungsgraden hin eröffnen sich ganz

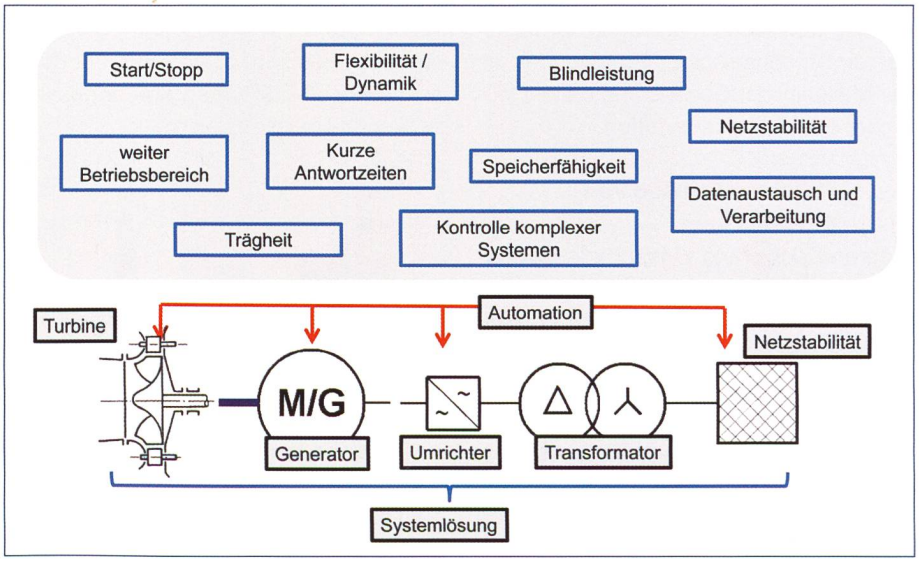


Bild 1. Gesamtsystem Wasserkraftwerk und die Anforderungen im elektrischen Netz.

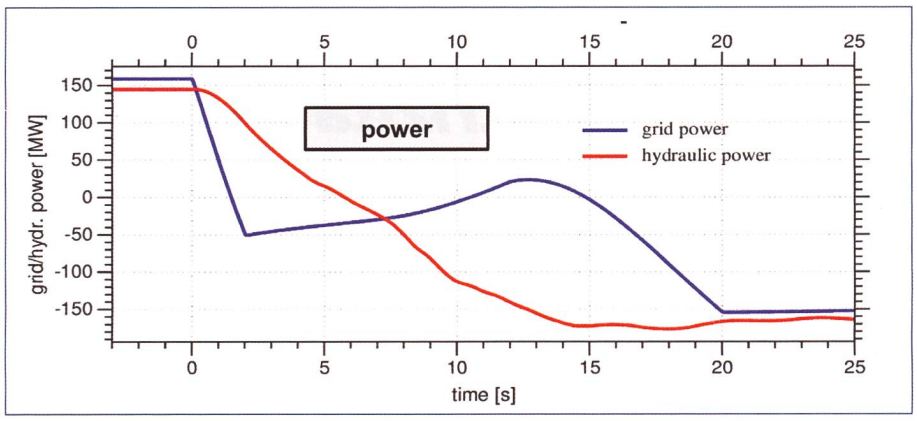


Bild 2. Umschalten von Pump- zu Turbinenbetrieb mit variabler Drehzahl: hydraulische Leistung (rot), aufgenommene Leistung (blau).

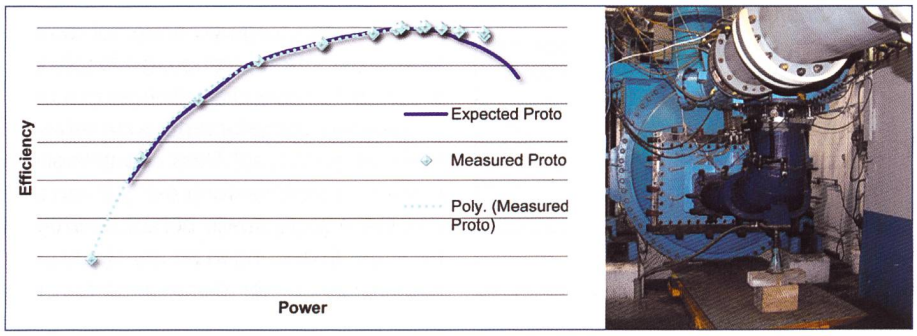


Bild 3. Gemessener Wirkungsgradverlauf einer Francis-Turbine, die für 0–100% Betrieb optimiert ist.

neue Möglichkeiten in der schnellen Ausregelung von Laständerungen im elektrischen Netz, siehe [2]. Dies wird am Beispiel des Umschaltvorgangs einer 150-MW-Pumpturbine mithilfe eine Frequenzumrichters und variabler Drehzahl gezeigt *(Bild 2)*. Die Einheit wird abgebremst, innerhalb von zwei Sekunden wird der Energiefluss umgekehrt und vom Netz aufgenommen. In den weiteren 12 Sekunden wechselt die Pumpturbine die Drehrichtung und beginnt als Turbine zu arbeiten. Der gesamte Umschaltvorgang ist in ca. 15 Sekunden abgeschlossen. Allerdings ist dies noch reine Simulation. Die Überprüfung der dadurch erzeugten Druckfelder und mechanischen Spannungen an der Maschine ist Gegenstand derzeit laufender Forschungsaktivitäten.

4. Flexibler Betrieb von 0–100% Last

Während der breite Einsatz von Vollumrichtern in der Wasserkraft noch eher Zukunftsmusik ist, ist der schonungslose Betrieb der Turbinen von drehender Reserve über tiefe Teillast bis hin zur Volllast heute Realität in vielen Kraftwerken. Das ist technisch gesehen eine gewaltige Herausforderung an die Maschinen, einerseits aus rein strömungstechnischen Gründen und andererseits wegen der damit einhergehenden hohen dynamischen Spannungen, die zu Ermüdung und Rissen, speziell in den Turbinenschaufeln, führen kann.

5. Strömungstechnische Aspekte

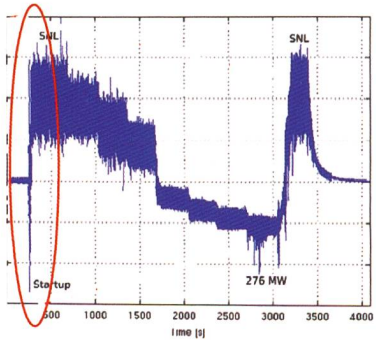
Der Betriebsbereich von Wasserturbinen ist aufgrund verschiedener physikalischer Effekte eingeschränkt. Da Francis-Turbinen (der häufigste Typ) nur einfach reguliert sind, sind sie stärker eingeschränkt als die doppelt regulierten Kaplan-Turbinen. Starke Wirbel können in tiefer Teillast zu Druckpulsationen führen. Im Saugrohrkonus tritt bei etwa 70% Last ein Wirbel auf, der Teillastzopf, der ebenfalls zu Druckpulsationen führt. In Volllast kann der sogenannte Volllastzopf zu einer strömungsbedingten Instabilität führen, die das gesamte wasserführende System zu Pulsationen bringt und damit den Betrieb unmöglich macht. Weiterhin ist das Betriebsgebiet durch das Kavitationsrisiko auf den Laufradschaufeln sowohl bezüglich Fallhöhe als auch Durchfluss eingeschränkt.

Dennoch gibt es Möglichkeiten, das Laufraddesign robuster, das heisst für einen breiten Betriebsbereich zu gestalten. Der Wirkungsgradverlauf ist dann typischerweise etwas flacher, siehe *Bild 3*.

6. Mechanische Aspekte

Aufgrund der ungeordneten Strömungsverhältnisse dominieren in der Teillast bis hin zum Betrieb als rotierende Reserve stochastische dynamische Lasten auf dem Laufrad. Das ist gut in *Bild 4*, links, zu erkennen, in welchem das Resultat einer Messung mit Dehnmesstreifen am Laufschaufelaustritt über den gesamten Leistungsbereich gezeigt wird. Die mechanische Analyse dieses spezifischen Laufrades ergibt, dass der Betrieb von einer Stunde Leerlauf eine Ermüdung verursacht, die äquivalent zu 10 Millionen Stunden Volllastbetrieb wäre. Entsprechend ist ein Start-Stopp-Zyklus äquivalent zu 240 Millionen Stunden Volllastbetrieb. In diesem konkreten Fall würde man als erste Massnahme zur Verlängerung der Lebensdauer des Laufrades das Hochfahren der Maschine langsamer und damit schonender ausführen und den Betrieb in tiefer Teillast beschränken. Weiterhin können die Wartungsintervalle aufgrund der vorliegenden Informationen abhängig von der Fahrweise der Maschinen optimiert werden.

Die hier gezeigten Resultate sind das Ergebnis sehr intensiver Entwicklungstätigkeit, häufig in Zusammenarbeit mit Anlagenbetreibern, um Messungen an der Anlage durchzuführen und damit die Restlebensdauer der Maschinen zu ermitteln. Ziele dieser Entwicklungstätigkeit sind die treffsichere Ermittlung der



Usage factor results

Condition	Duration	Normalized damage [C/Cmax]
Start up	1x	0.85
Spin no load	24h	0.82
Part load (rope)	24h	7.6E-05
Maximum power	24h	9.5E-08

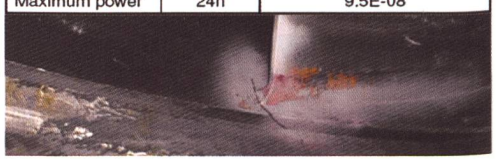


Bild 4. Mechanische Spannung an einer Francis-Laufschaufel, gemessener Verlauf über Leistung (links) und Riss am Laufradaustritt (rechts).

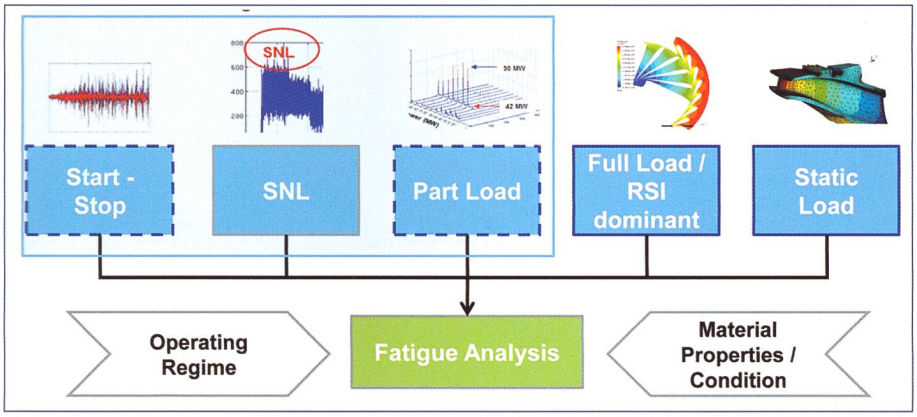


Bild 5. Berechnungsmethoden für die Festigkeit und Restlebensdauer von Laufrädern.

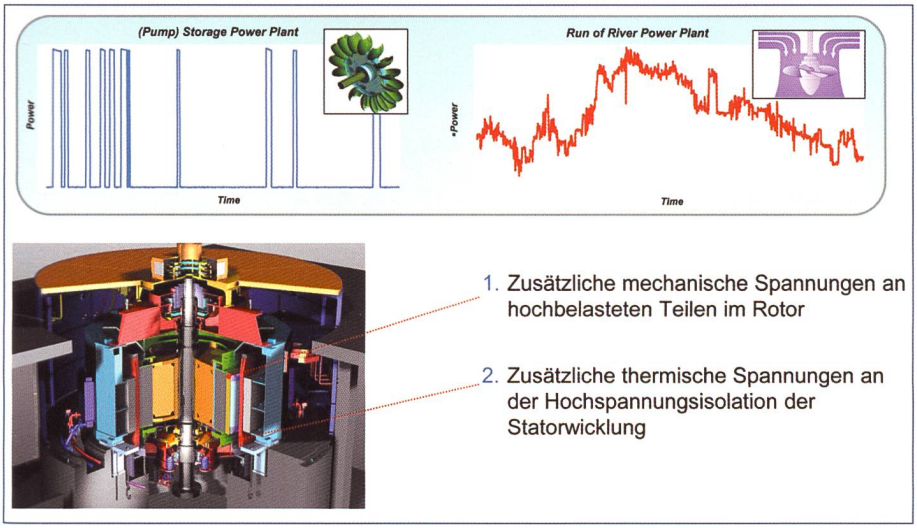


Bild 6. Typischer Leistungsverlauf Speicherkraftwerk (oben links) und Laufwasserkraftwerk (oben rechts).

Lebensdauer der Maschinenkomponenten, abhängig von der Betriebsweise der Maschine, siehe *Bild 5*, und das robuste Design der Maschine, sodass sie optimal flexibel betrieben werden kann. Wenn ein Laufraddesign nicht von vorneherein genügend robust konzipiert ist, so ist die Lebensdauer stark von der Betriebsweise der Maschine abhängig. Verschiedene Betriebsarten kosten entsprechend verschieden viel Lebensdauer – wir sprechen von «costs of operation», siehe [3].

7. Start – Stopp des Maschinensatzes

Das häufige Aufstarten und Herunterfahren des Maschinensatzes bewirkt sowohl bei der Turbine als auch beim Generator zusätzliche mechanische und, beim Generator, thermische Spannungen an der Hochspannungsisolation, die bei der Lebensdaueranalyse berücksichtigt werden müssen. *Bild 6* illustriert die Fahrweise eines modernen Speicherkraftwerks mit häufigem Anfahren und Stoppen der Maschinensätze.

Während früher die Festigkeit der Generatoren auf Basis von statischen Belastungsannahmen garantiert werden konnte, wird diese Annahme der heutigen Fahrweise von Wasserkraftwerken nicht mehr gerecht. In der Lebensdaueranalyse von Generatoren werden darum neu auch die Start-Stopp-Zyklen berücksichtigt. Betroffen sind vor allem die hochbelasteten Rotorkomponenten (Rotor-Ring und Pol-Endplatte).

8. Die neue Wasserkrafttechnologie

Die Veränderungen am Energiemarkt und im Stromnetz haben massive Auswirkungen auf Wirtschaftlichkeit und Betrieb von Wasserkraftwerken, denen wir mit innovativen Lösungen begegnen. Einige der Lösungen, mit denen Wasserkraftwerke vor allem für wertvolle Regelenergie und Netzdienstleistungen eingesetzt werden können, sind in diesem Artikel vorgestellt. Die mögliche Verringerung der Lebensdauer wichtiger Komponenten aufgrund der flexiblen, dynamischen Betriebsweise der Kraftwerke ist hier ein Thema, dessen sich die Betreiber bestehender Kraftwerke annehmen müssen und für das technische Lösungen vorhanden sind oder entwickelt werden. Weitere wichtige Treiber für Innovationen sind die Leistungselektronik und Automation, um Sicherheit und Stabilität des Netzbetriebs zu gewährleisten.

Literatur

[1] *Staiblin, J.* «Transformation der Energielandschaft – die neue Realität», Vortrag Powertage, Zürich, 2014.

[2] *Hell, J., Egretzberger, M., Lechner, A., Vaillant. Y.*, «Power balancing in the grid – a dynamic apporach with a pumped storage unit», Power-Gen Europe 2013, Vienna, June 4–6, 2013

[3] *Sick, M., Oram, Chr., Braun, O., Nennemann, B., Coutu, A.* «HPP delivering regulating power: Technical challenges and costs of operation» Hydro2013, Innsbruck, October 7–9, 2013.

Anschrift der Verfasserin

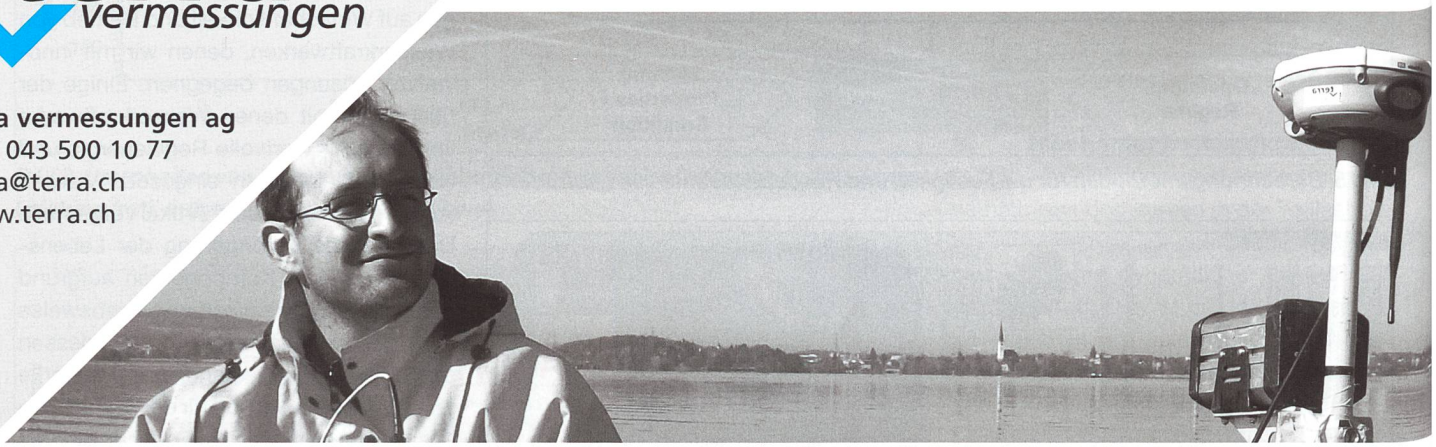
Mirjam Sick, Vice President, R&D und Innovation, Andritz Hydro

mirjam.sick@andritz.com.

terra vermessungen

Unsere **Referenz** – Rundum **zufriedene Kund**

terra vermessungen ag
Tel.: 043 500 10 77
terra@terra.ch
www.terra.ch



HYDROGRAPHIE | STRÖMUNGSMESSUNG | SEEGRUNDKARTIERU

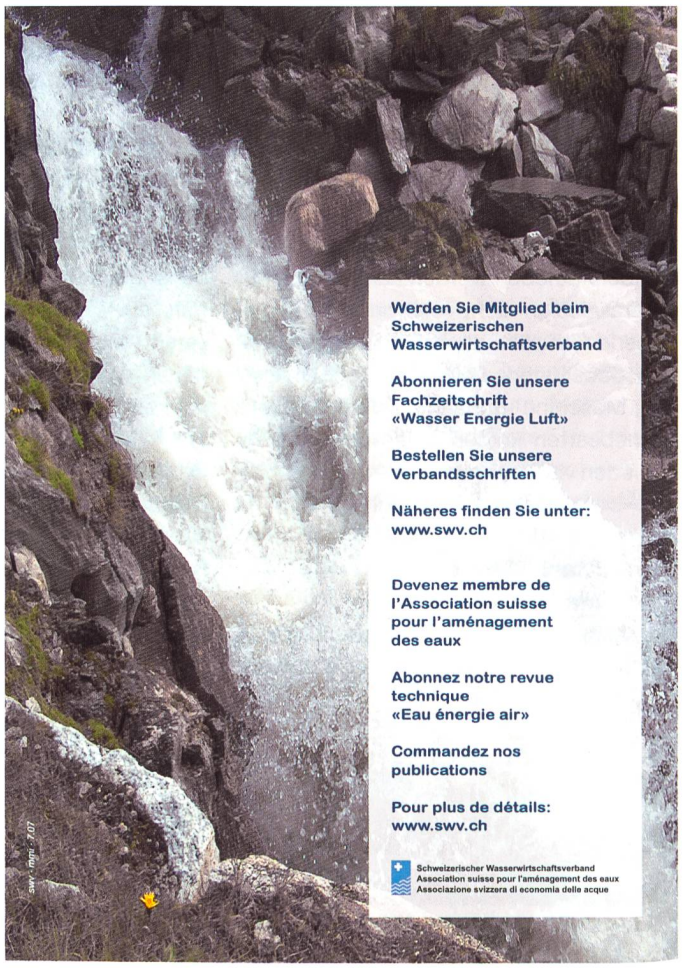
H. ERNE METALLBAU AG

VERTRAUEN IN STAHL

www.h-erne.ch info@h-erne.ch Tel. +41 (0)56 268 00 20

Steiächerweg 12
CH-5316 Leuggern

Engineering, Fertigung und Montage

- Tafel-, Segment- und Rollschützen
- Drucktore / -türen
- Stauklappen
- Fein- und Grobrechen
- Dammbalken
- Druckrohrleitungen in Stahl
- Panzerungen in Stahl
- Revisionen an Stahlwasserbauteilen

STAHLWASSERBAU · UMWELTTECHNIK · STAHL-/METALLBAU